

Aaron Eskelinen

Kevytajoneuvon ajodynamiikka

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Tekniikan ala

Auto- ja kuljetustekniikka

Opinnäytetyö

30.9.2013

Tekijä Otsikko	Aaron Eskelinen Kevytajoneuvon ajodynamiikka
Sivumäärä Aika	17 sivua + 1 liite 30.9.2013
Tutkinto	Tekniikka
Koulutusohjelma	Auto- ja kuljetustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Tuotetekniikka
Ohjaaja	Teknologiapäällikkö Pekka Hautala
<p>Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ajodynamiikkaa kevytajoneuville. Tähän sisältyy ohjausgeometria, ajotilapiirros sekä jarrujen ja ripustuksen mitoittaminen. Ajoneuvo on nelipyöräinen, sähköavusteinen velomobiili, joka kantaa kaksi polkijaa sekä matkatavarat. Siihen pätevät samat ajodynamiikan ja ohjausgeometrian laskelmat kuin raskaampiinkin nelipyöräisiin ajoneuvoihin.</p> <p>Ajotilapiirrokseseen summataan kaikki ajovastukset ja verrataan niitä ajoneuvon suorituskykyyn. Näin saadaan selville esimerkiksi ajoneuvon kyky nousta tietyn jyrkkyyden mäkeä ylös eri vaihteilla. Piirrokseseen voi myös lisätä ja vaihtaa ajoneuvon ominaisuuksia, jotta suorituskyvystä saadaan kuva teoriassa ennen kuin muutos tehdään todelliseen ajoneuvoon.</p> <p>Ohjausgeometriassa lasketaan tarvittavat pyörien kulmat trigonometrian avulla. Laskut auttavat myös ripustuksen suunnittelussa.</p> <p>Opinnäytetyön aikana valmistettiin yksi prototyyppi, jonka ajodynamiikka perustuu tämän työn laskelmille.</p>	
Avainsanat	Kevytajoneuvo, ajodynamiikka, ajotilapiirros, ohjausgeometria

Author Title	Aaron Eskelinen Driving Dynamics of a Velomobile
Number of Pages Date	17 pages + 1 appendix 30 September 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Automotive engineering
Specialisation option	Automotive Design Engineering
Instructor	Pekka Hautala, Technology Manager
<p>The objective of this thesis was to plan driving dynamics for a velomobile. This includes calculating steering geometry, creating a performance sheet, and selecting the most suitable brakes and suspension. The velomobile is a four-wheel vehicle that is driven by two passengers with pedals, which power the back wheels, and has also electric motors to drive the front wheels. The same driving dynamics and steering geometry calculations apply in this vehicle as in heavier four-wheel vehicles.</p> <p>The vehicle performance sheet consists of all the resisting forces summed and the vehicle's own ability to push against the resisting forces. One can, therefore, tell from the performance sheet how well the vehicle is able to climb at a specific angle at different gear ratios. It is also possible to add modifications to the sheet and see performance results in theory before adding the modifications to the actual vehicle.</p> <p>The correct steering geometry angles are calculated with trigonometry. The calculations also help with the suspension design.</p> <p>During this project one prototype was built based on these driving dynamics calculations.</p> <p>.</p>	
Keywords	Velomobile, driving dynamics, performance sheet, steering geometry

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoitteet	1
2	Ajotilapiirros	2
2.1	Lähtötiedot	2
2.1.1	Vierintävastus	3
2.1.2	Ilmanvastus	4
2.1.3	Nousuvastus	5
2.2	Ajotilapiirroksat	6
3	Ohjausgeometria	10
3.1	Lähtötiedot	10
3.2	Laskelmat	11
4	Pyörien ripustus	12
4.1	Lähtötiedot	12
4.2	Etuakseli	12
5	Jarrut	13
5.1	Jarrujen valinta	13
6	Johtopäätökset	15
7	Yhteenveto	16
	Lähteet	17
	Liitteet	18
	Liitteet	
	Liite 1. Ajotilapiirroksen Excel-tiedosto	

1 Johdanto

1.1 Tausta

Tämä opinnäytetyö käsittelee nelipyöräisen kevytajoneuvon ajodynamiikkaa. Kevytajoneuvolla tarkoitetaan ajoneuvoa, joka on lain mukaan polkupyörä, eikä vaadi rekisteröimistä tai ajolupaa (1, 19 §). Ajoneuvon ollessa nelipyöräinen, siihen soveltuvat samat ajodynamiikan laskelmat, kuin raskaampiinkin ajoneuvoihin. Tämä auttaa ajotuntuman parantamisessa ja suorituskyvyn mitoittamisessa. Kevytajoneuvon liittyvässä projektissa tehtiin kolme opinnäytetyötä, joista tämä on yksi. Kaikki tämän työn kuvat ovat projektiin osallistuneiden opiskelijoiden ottamia ja kaaviot itse laskettuja.

1.2 Tavoitteet

Ajoneuvon runkorakenteen tuli olla alumiiniprofiileista koottu, ja sen haluttiin olevan helposti valmistettavissa. Tässä työssä keskitytään ajodynamiikan suunnitteluun, joka sisältää ajotilapiirroksen, ohjausgeometrian, pyörän ripustukset ja jarrut. Kahdessa muussa työssä tarkastellaan voimansiirtoa ja sähkökäyttöisyyttä. Kevytajoneuvosta on tarkoitus tehdä mahdollisimman henkilöautomainen, kunhan kustannukset pysyvät kohtuullisina. Ohjausratkaisuksi prototyyppiin sopivimmaksi koettiin mikroautoissa käytetty ohjausvarsi-raidetankoyhdistelmä, koska ajoneuvolle vaadittiin nopeaa ja tunnokasta ohjausta yksinkertaisella rakenteella. Ajoneuvon massan ollessa alle 200 kg jarruiksi sopivat hyvin mönkijän suljettu hydraulijarrujärjestelmä.

Ensimmäinen prototyyppi valmistettiin Metropolian tiloissa tilaajien kustannuksella. Ajoneuvo suunniteltiin opiskelijoiden, Metropolian työntekijöiden sekä tilaajien kesken. Valmistus tapahtui opiskelijoiden ja Metropolian henkilökunnan toimesta.

Ajodynamiikan suunnittelu kevytajoneuvon on yhtä tärkeää kuin raskaampaan henkilöautoon, mikäli ajotuntumasta halutaan luotettava ja turvallinen. Samat laskelmat käyvät niin urheiluautoihin kuin kevytajoneuvoihin.

2 Ajotilapiirros

2.1 Lähtötiedot

Ajotilapiirros kertoo ajoneuvon suorituskyvyn suhteessa ajovastuksiin. Ajovastuksia ovat ilman-, vierintä-, nousu- sekä voimansiirtovastus. Vastukset esitetään piirroksessa eri nousuprosenttien mukaan, eli jokaiseen eri nousua esittävään käyrään on ynnätty kaikki vastukset. Piirroksessa y-akselilla on vastustava voima newtoneina ja x-akselilla nopeus kilometreinä tunnissa, koska vierintä- ja ilmanvastus kasvavat nopeuden mukaan. Ajotilapiirroksen tarkoitus on antaa kuva ajoneuvon suorituskyvystä teoriassa. Siitä selviää esimerkiksi se, onko ajoneuvossa tarpeeksi vääntömomenttia kumoamaan ajovastukset eri nopeuksissa, mikä auttoi voimansiirron ja sähkömoottorien mitoittamisessa. Piirroksissa on suorituskky ainoastaan mekaanisella voimansiirrolla ilman sähkömoottoreita, koska moottoreista ei ole saatavilla tarkkoja teknisiä tietoja. Ajotilapiirroksen oheen tehtiin suuntaa antava voimakuvaaaja sähkömoottoreille, jotta niiden suorituskyvystä saisi jonkinlaisen kuvan. Napamoottorien valmistajan kotisivuilta sai taulukon, jossa kerrottiin vääntö rajatulla kierrosalueella (253–480 1/min) (2), mistä oli mahdollista luoda jonkinlainen vääntömomentin kuvaaja (kuva 9). Ajovastuksien lisäksi piirrokseen kuuluu fk-kuvaaja, joka kertoo ajoneuvon voimansiirron mahdollistaman nopeuden joka vaihteella (kuva 8).

Mekaaninen voimansiirto päätettiin toteuttaa ketjuilla ja hammaspyörillä. Vaihteistoksi soveltui parhaiten polkupyörän napavaihteisto, jossa välityksien muutos tapahtuu kuoren sisällä. Tämä on ajotuntuman kannalta parempi vaihtoehto kuin ratasvaihteisto, jossa ketjut liikkuvat sivuttain vaihteita vaihdettaessa. Napavaihteistossa tätä liikettä ei ole ja siten ketjut pysyvät varmemmin hammasrattailla. Vaihteisto koostuu kahdesta hammaspyörästä ja niiden välissä olevasta vaihdekotelosta. Toinen hammaspyörä tuo voiman sisään, ja toinen vie voiman valitun välityksen mukaan. Ajoneuvon voimansiirto koostuu polkijaparista, kahdesta napavaihteistosta sekä väliakselista, josta veto menee kummallekin takapyörälle oman yksisuuntalaakerin välityksellä. Väliakselilla yksisuuntalaakerit toimivat tasauspyörästä tavoin antaen toisen takapyörän pyöriä eri nopeudella kuin toinen käännettäessä. Voimansiirtovastus huomioitiin kertoimena, koska todellista voimansiirtovastusta ei mitattu. Kerroin perustuu oletukseen (3, s. 16), että mekaanisessa voimansiirrosta syntyy häviöitä noin 10 prosenttia energian muuttaessa muotoaan. Kun polkimien ja takarenkaiden välillä on kolme eri välitystä, saadaan voimansiirtovastuskertoimeksi 0,7.

Ajotilapiirroksia haluttiin kaksi, koska ajoneuvon massa ei ole suuri ja tällöin kuorma vaikuttaa ajodynamiikkaan merkittävästi. Yksittäin punnittujen osien ja materiaalien tietojen perusteella massa on noin 150 kg. Prototyyppiä ei ole punnittu, koska ajoneuvovaakaa ei ollut saatavilla. Kattavin kuva ajoneuvon ajettavuudesta saadaan ottamalla ensimmäiseen piirrokseen kevyt kuorma ja toiseen suuri kuorma. Ensimmäinen kuorma koostuu 70 kg:n kuljettajasta ja 20 kg:n matkatavaroista (kuva 6). Toisessa piirroksessa kuorma on kuljettaja mukaan lukien 250 kg nostaen kokonaismassan 400 kilogrammaan (kuva 7). Tätä suurempaa kuormaa ajoneuvo ei ole suunniteltu kantamaan.

2.1.1 Vierintävastus

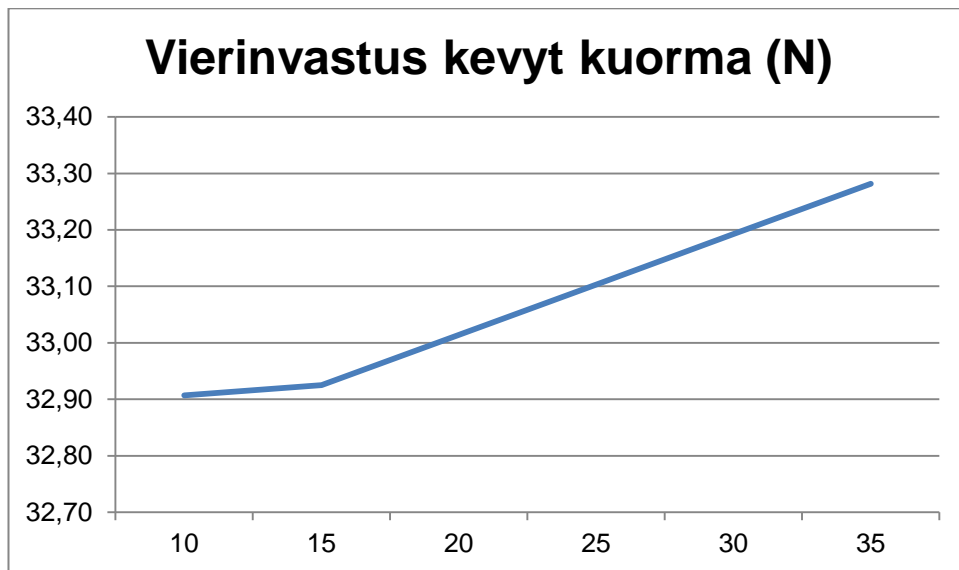
Vierintävastukseen vaikuttaa eniten ajoneuvon massa ja renkaat. Runko oli alun perin valmistettu ainoastaan alumiiniprofiiliputkista ja sen alapuolisesta 2 mm:n alumiinilevystä, mutta kantavuuden parantamiseksi lisättiin vielä yläpuolinen 2 mm:n levy sekä neljä pitkittäin asetettua teräksistä u-profiilia alapuolelle. Yhteismassa jäi BOM-laskelmien (bill of materials eli osaluettelon) mukaan alle 200 kilogramman. Ajovastuslaskelmiin omamassaksi oletettiin 150 kg.

Laskelmiin tarvitaan renkaiden tiedoista nimelliskantavuus, maksimi-ilmanpaine ja nimellisvierinvastus. Todellinen vierinvastus (f_r) lasketaan yhtälöllä

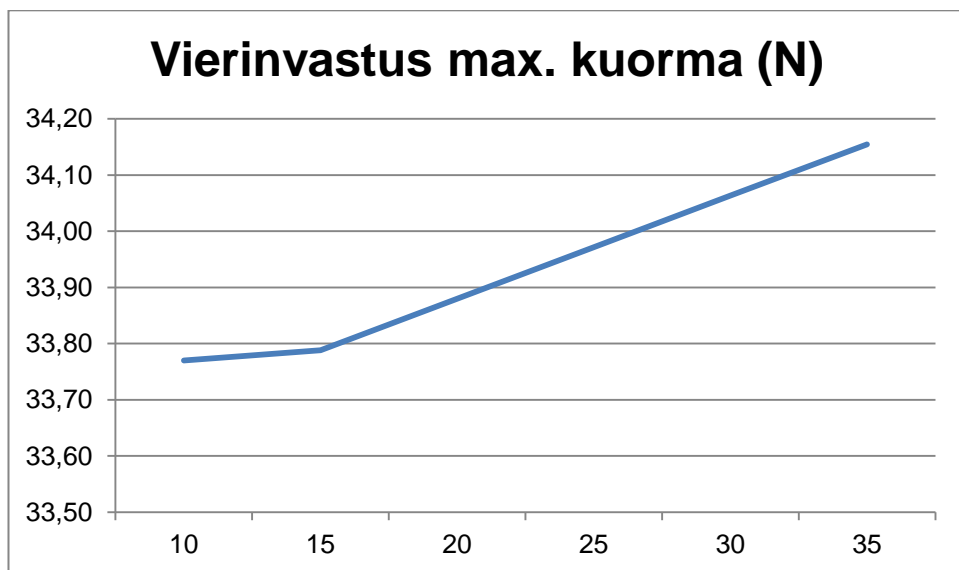
$$f_r = f_R \left(1,3 - 0,3 \frac{p}{p_R} \right) \left(1,3 - 0,3 \frac{N_R}{G_r} \right) \quad (3, \text{ s. } 17),$$

jossa (f_R) on nimellisvierinvastus, (p) todellinen rengaspaine, (p_R) maksimirengaspaine, (N_R) nimelliskantavuus ja (G_r) todellinen pyöränkuorma. Vierinvastuskertoimen määrittäminen menee SAE J 1270 (1979) -normin mukaan. Nimellisvierinvastus yleensä kerrotaan rengastiedoissa, mutta ajoneuvossa käytetyissä renkaissa sitä ei tiedetty, joten se arvioitiin henkilöauton renkaiden nimellisvierinvastuksen mukaan. Nimellisvierinvastuskerroin kasvaa nopeuden mukaan, mutta kasvun vaikutus alkaa näkyä merkittävästi suuremmissa nopeuksissa kuin ajoneuvon on suunniteltu saavuttavan. Kerroin on siis suurempi kuin todellisuudessa, joten laskettu vierinvastusvoimakin on hieman suurempi. Vastus jää kuitenkin melko pieneksi. Kuvasta 1 esimerkiksi näkee, että 30 km:n tuntinopeudella se on noin 33,17 newtonia kevyellä kuormalla. Kuviossa 2 on vierinvastus raskaalla kuormalla ja siinä samassa 30 km:n tuntinopeudessa vastus on noin 34,05 newtonia.

Matalat nopeudet saavat vierinvastuksen pysymään lähes samana ajoneuvon huippunopeuteen asti. Vierinvastus ei nouse 10–35 km:n tuntinopeuksissa edes yhtä newtonia raskaallakaan kuormalla.



Kuva 1. Vierinvastus (N) kevyellä kuormalla nopeuden (km/h) mukaan



Kuva 2. Vierinvastus (N) maksimikuormalla nopeuden (km/h) mukaan

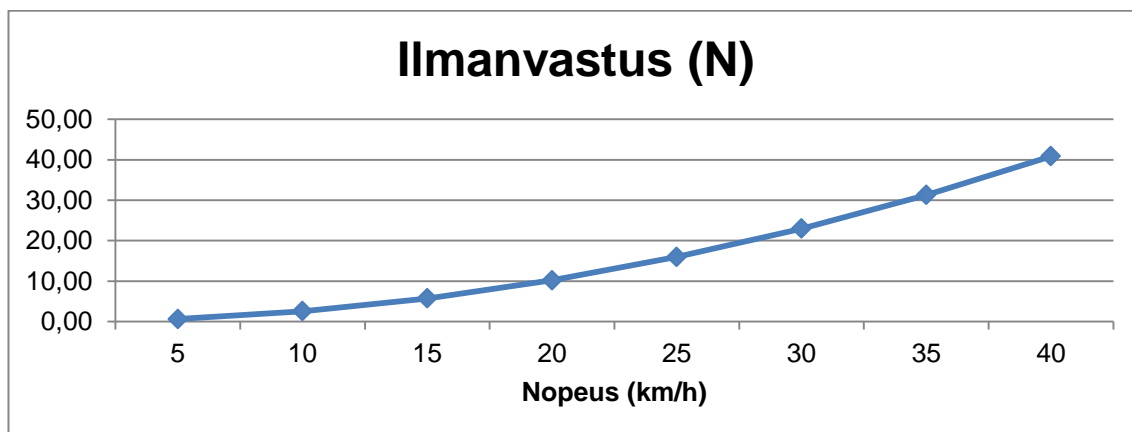
2.1.2 Ilmanvastus

Ilmanvastus kasvaa ajonopeuden mukaan. Ajoneuvon huippunopeus on noin 20–30 kilometriä tunnissa, joten ilmanvastusvoima ei ole suuri. Ajoneuvon suhteellisen korkea

profiili kuitenkin suurentaa vastusta, joten ilmanvastus on huomioitu. Ilmanvastuskertoimeksi (c_w) arvioitiin 0,35 (henkilöautoissa yleensä 0,3–0,4) (3, s. 30). Otsapinta-ala (A) on 1,589 m². Näiden tulo, $c_w \cdot A$, on ajoneuvokohtainen luku, jota käytetään ilmanvastuksen laskemiseen. Vastus saadaan kaavalla

$$F_i = \frac{\rho}{2} c_w A v^2 \quad (3, \text{ s. } 27),$$

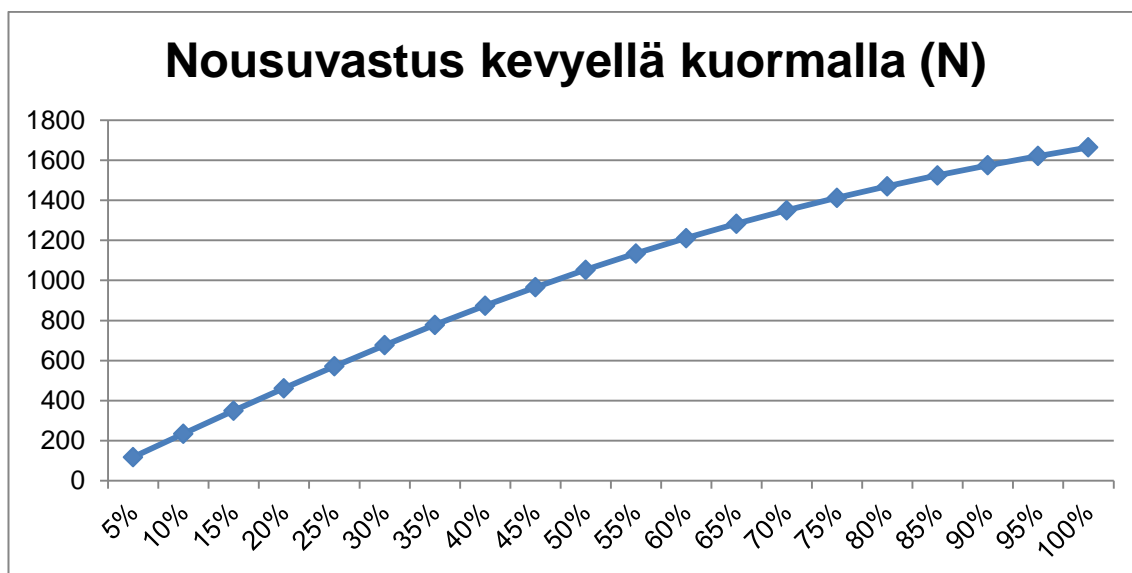
jossa vastusvoima F_i saadaan jakamalla vallitseva ilman tiheys (ρ) kahdella ja kertomalla ilmanvastuskertoimen ja otsapinta-alan tulo nopeuden neliöllä. Ilman tiheydeksi oletettiin 1,19 kg/m³, joka pitää paikkansa normiolosuhteissa (4, s. 71) 1 bar:n ilmanpaineessa (maan pinnalla) ja 20 °C:n lämpötilassa. Kuvassa 3 näkyy ilmanvastuksen nousu suhteessa ajonopeuteen: 25 km:n tuntinopeudessa vastus on noin 16 newtonia.



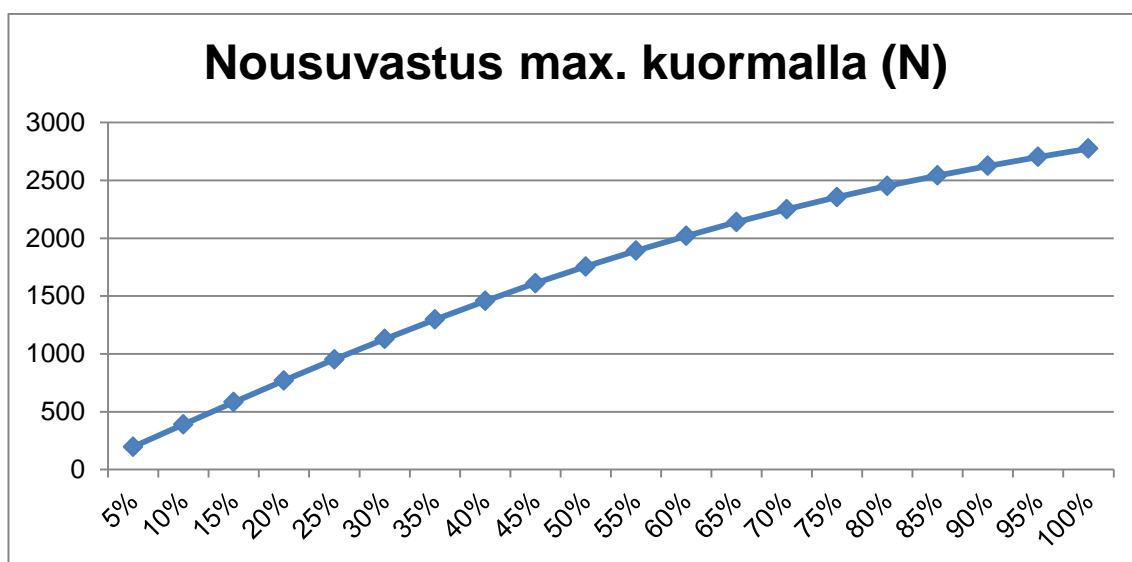
Kuva 3. Ilmanvastus suhteessa nopeuteen

2.1.3 Nousuvastus

Nousu ilmoitetaan prosentteina. 100 prosentin nousu tarkoittaa 45:tä astetta. Nousun luomaan vastuksen laskemiseen tarvitaan ajoneuvon massa ja painojakauma, koska painon jakaantuminen eri tavoin etu- ja taka-akselille vaikuttaa nousuvastuksen suuruuteen. Painojakauman oletettiin olevan tasainen, eli kummallekin akselille tuleva massa on sama, koska ilman ajoneuvovaakaa todellista painojakaumaa ei tiedetty. Suurin osa ajoneuvon massasta kohdistuu sen keskelle, joten oletettu painojakauma on lähellä todellisuutta. Nousuvastus lasketaan yhtälöllä $F_n = G \sin \alpha$ (3, s. 37), jossa vastusvoima F_n saadaan kertomalla ajoneuvon tuottama painovoima tien kulman sinillä. Käyrässä on ilmoitettu vastus 5 %:n nousun välein. Ohessa kuvat 4 ja 5 näyttävät nousuvastuksen kevyellä ja suurimmalla mahdollisella kuormalla nousun mukaan.



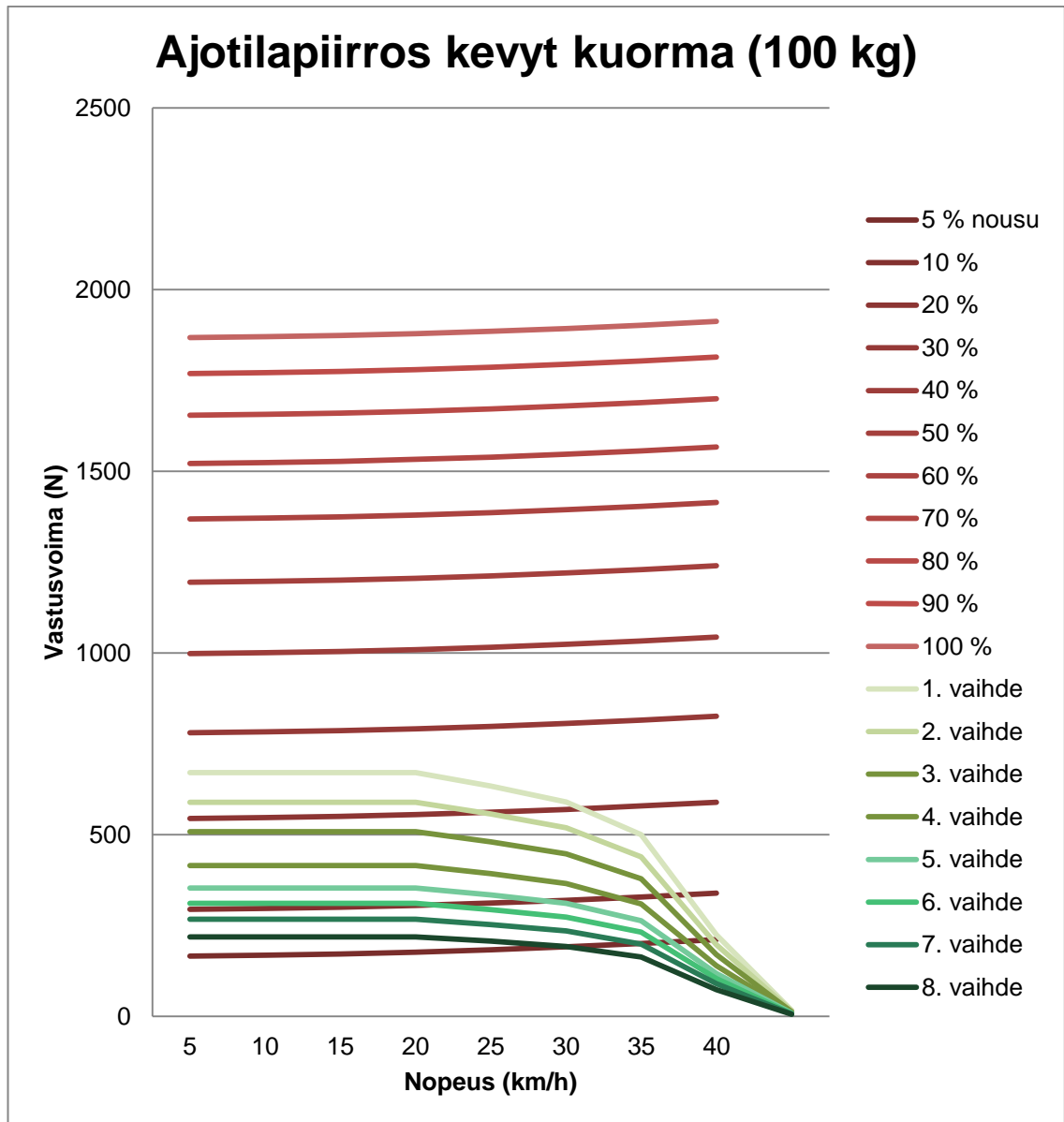
Kuva 4. Nousuvastus mäen jyrkkyyden mukaan kevyellä kuormalla. X-akselilla nousu prosentteina ja y-akselilla vastusvoima newtoneina.



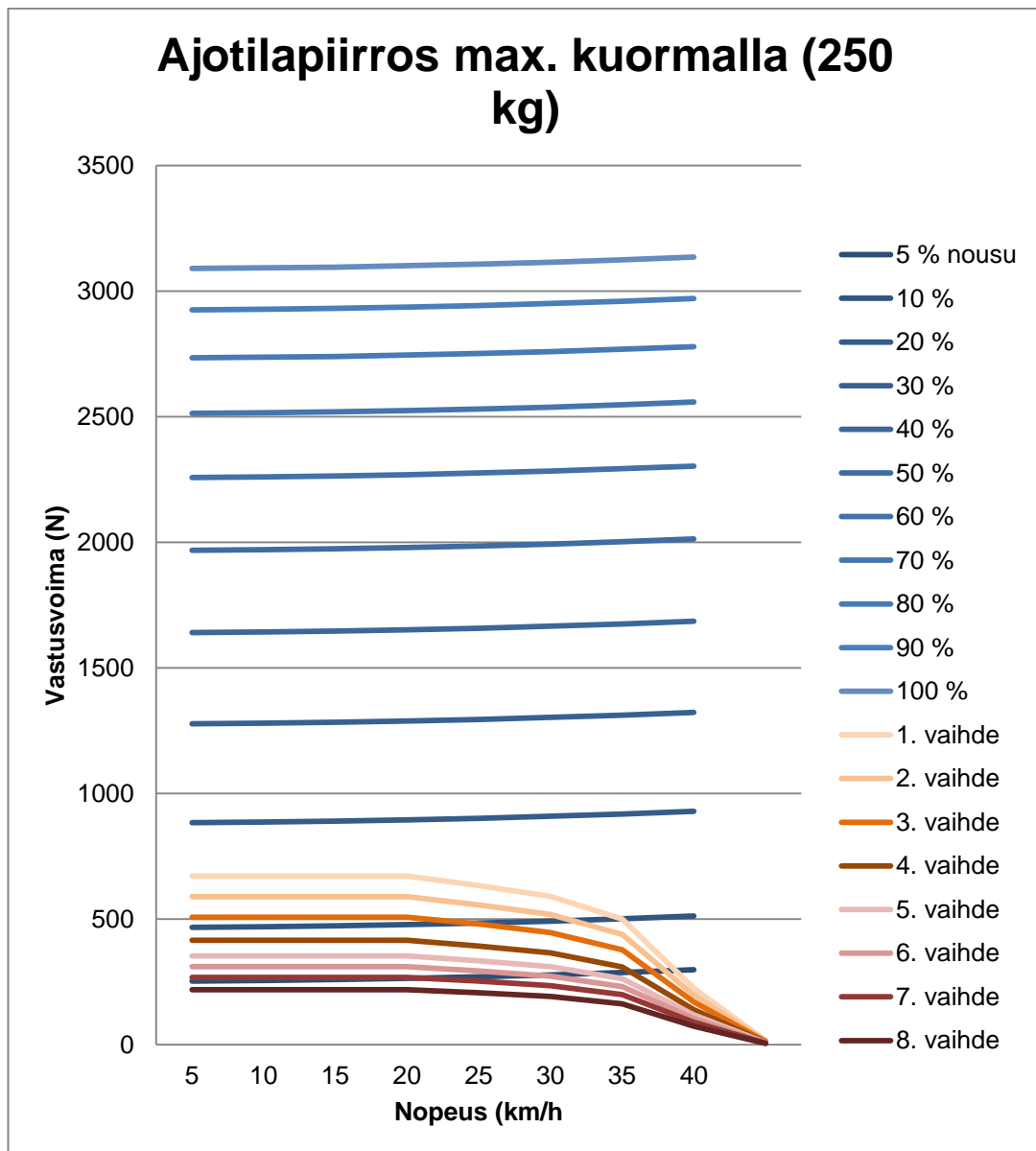
Kuva 5. Nousuvastus mäen jyrkkyyden mukaan täydellä kuormalla.

2.2 Ajotilapiirrokset

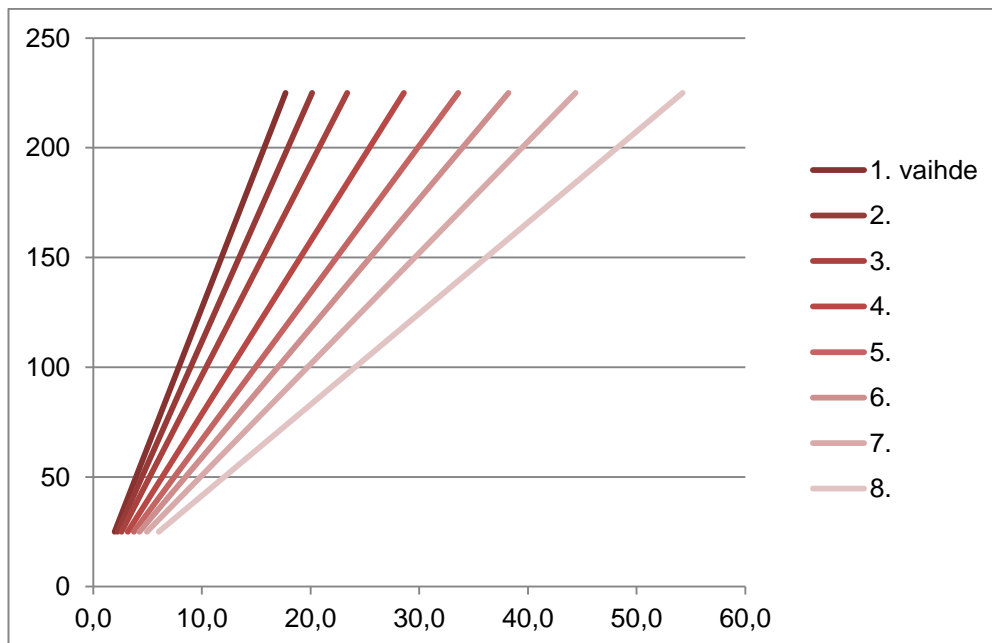
Ohessa (kuvat 6 ja 7) ovat lopulliset ajotilapiirrokset ynnättyine vastuksineen sekä ajoneuvon suorituskykyineen. Piirroksista näkee, että suurin mahdollinen nousu ensimmäisellä vaihteella ilman sähköavusteisuutta on 20:n ja 30 prosentin nousun välillä kevyellä kuormalla. Täydellä kuormalla suurin mahdollinen nousu ensimmäisellä vaihteella on 10:n ja 20 prosentin välillä.



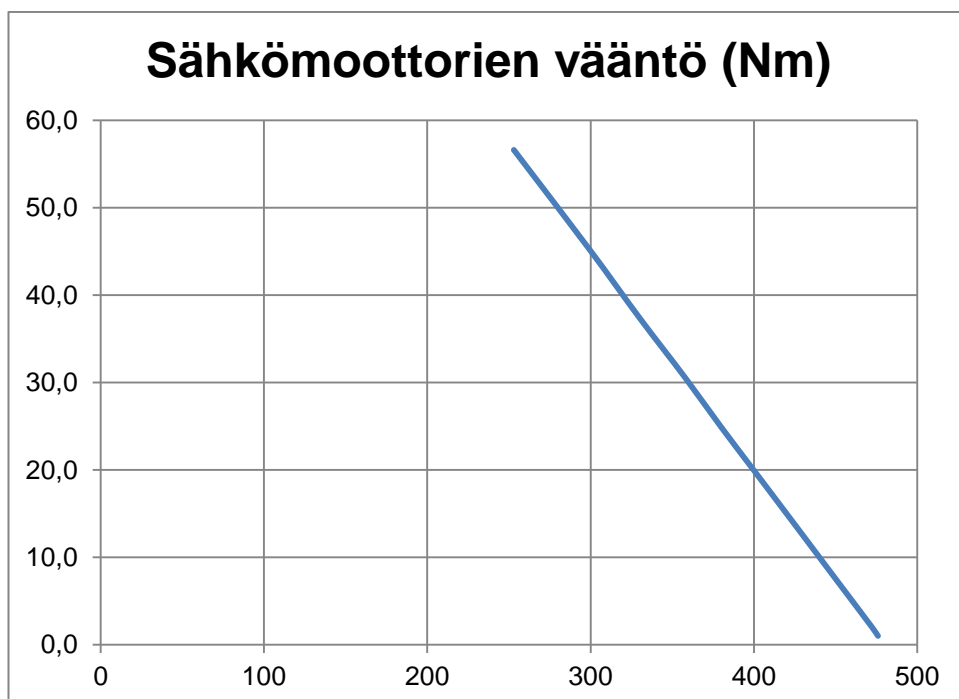
Kuva 6. Ajotilapiirros kevyellä kuormalla



Kuva 7. Ajotilapiirros maksimikuormalla



Kuva 8. Nopeudet eri vaihteilla. X-akselilla nopeus (km/h), y-akselilla polkimien kierrosnopeus (rpm).

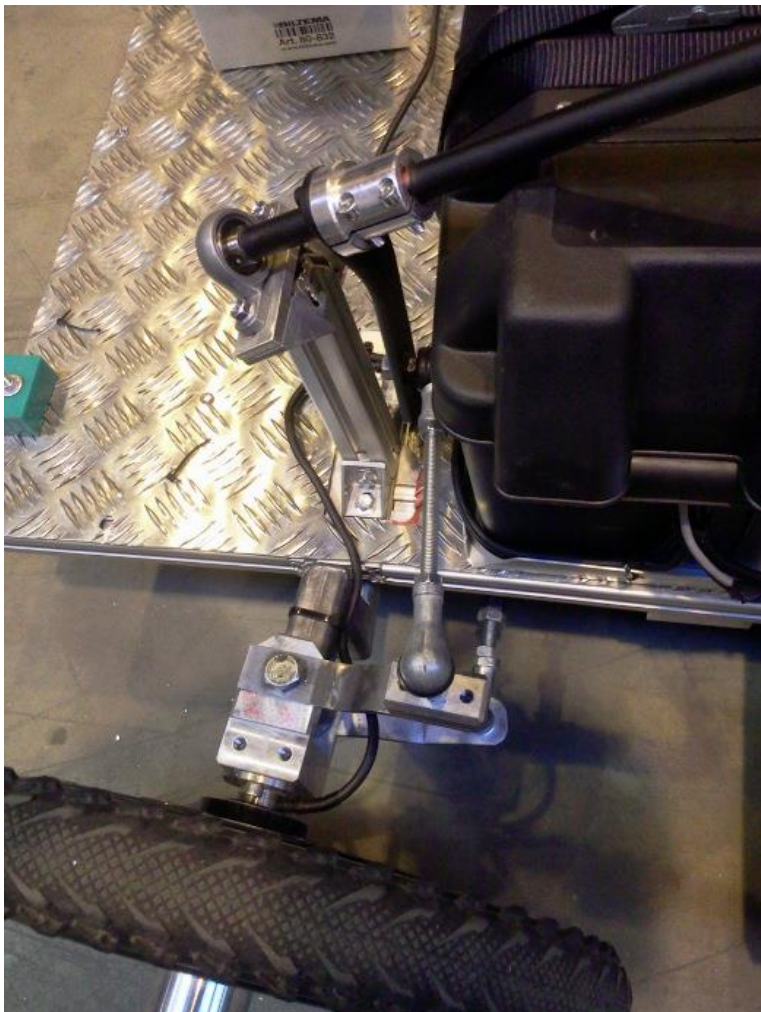


Kuva 9. Sähkömoottorien yhteenlaskettu vääntömomentti. Y-akselilla momentti (Nm) ja x-akselilla kierrosnopeus (rpm).

3 Ohjausgeometria

3.1 Lähtötiedot

Ohjauksesta haluttiin nopea ja tunnokas yksinkertaisella rakenteella. Ohjauksen tuli myös suoristua itsestään, jotta tuntuma olisi hyvä ja luotettava. Ohjausgeometria mallinnettiin Ackerman-ehdon mukaan (3, s. 132). Kääntösäteen toivottiin olevan mahdollisimman pieni. Prototyypin kääntösäde on nyt noin 7 metriä, mutta ohjauksen osia muokkaamalla se on pienennettävissä. Etuakseliin laitettiin kiinteä 5 asteen caster-kulma olkanivelelle ohjauksen palautuvuuden aikaansaamiseksi. Kuvissa 10 ja 11 näkyy ohjauksen rakenne. Kuvissa näkyy kääntövarsi, joka kiinnittyy alapuoliseen raidetankoon. Toisella puolella varsi on samanlainen. Tätä osaa muokkaamalla kääntösäteestä saisi pienemmän, sillä nyt molemmin puolin palat ottavat kiinni etuakseliin nopeasti. Mikäli kääntövarsista leikataan osa pois tai ne vaihdetaan kokonaan uudelleen mallinnettuihin varsiin, renkaat kääntyisivät enemmän ja kääntösäde olisi näin pienempi.



Kuva 10. Ohjaus vasemmalta

3.2 Laskelmat

Nelipyöräisessä ajoneuvossa Ackerman-ehdon mukaan ohjauksen sortokulma lasketaan akselivälin, ajoneuvon taka-akselin keskilinjan sekä olkanivelen väliin muodostuvasta kolmiosta. Kulma saadaan ottamalla suorakolmion hypotenuusasta ja lyhyemmästä kateetista tangenti. Ohjauksen sortokulmaksi saatiin näin 13,5 astetta. Alapuoliseen raidetankoon kiinnittyvät kääntövarret asennettiin tähän kulmaan. (Kuva 11.)



Kuva 11. Ohjaus edestä

4 Pyörien ripustus

4.1 Lähtötiedot

Poljettavaan, kevyeen ajoneuvoon ei kannata laittaa liian pehmeää jousitusta (5, s. 95), koska suuri osa polkuvoimasta menee jousivoimien kumoamiseen. Toisaalta täysin jousittamattoman nelipyöräisen ajoneuvon takarengas saattaa nousta ilmaan käännnyttäessä voimakkaasti, mikä taas ei saa ajoneuvoa tuntumaan luotettavalta. Kaikkien renkaiden on siis pysyttävä maassa. Eturipustusratkaisuksi päätettiin muun muassa traktoreissa käytetty nivelöity jäykkä etuakseli, jossa jousina toimivat pohjaanlyöntikumit. Tämä mahdollistaa 30–40 mm pystyliikkeen eturenkaille ja estää takarenkaita nousemasta käännnyttäessä. Takarenkaat kiinnitettiin suoraan runkoon akseleistaan. Taakse ei tarvita lisäjousitusta renkaiden profiilin ollessa melko suuri ja istuimen pehmeä. Koeajojen perusteella alusta on toimiva ja mukava.

4.2 Etuakseli

Keinuvan etuakselin rakenne koostuu teräspalkista, joka toimii akselina, keskellä olevasta laakeripukista sekä pohjaanlyöntikumeista, jotka toimivat jousina (kuva 12). Akseli on kiinni rungon alapuolella kahdella laakeripukilla. Teräspalkki on paksuudeltaan 30 x 30 mm 2 mm:n seinämineen. Rungon ollessa muuten lähes kokonaan alumiininen etuakselin on oltava terästä, sillä suurin osa akseliin kohdistuvista voimista tulee sen keskelle, mikä loisi liian suuren rasituksen alumiiniselle etuakselille. Rakenteen valitsimme sen yksinkertaisen toimivuuden ja lyhyessä ajassa toteutettavuuden vuoksi. Ohjauksen palautuvuus toteutettiin kiinteällä caster-kulmalla etuakseliin. Olkanivel asettuu etuakseliin 5 asteen kulmaan.



Kuva 12. Etuakselin kiinnityspiste sekä alapuolinen raidetanko

5 Jarrut

5.1 Jarrujen valinta

Koska ajoneuvon massa on alle 200 kg, jarruiksi sopivat hyvin mönkijän suljettu hydraulijarrujärjestelmä takarenkailla. Kummallakin takarenkaalla on siis hydrauliset levyjarrut kaksimäntäisillä jarrusatuloilla (kuvat 13 ja 14). Jarrukahvassa on sekä jarrunestesäiliö että seisontajarru. Jarrut valittiin systeemin yksinkertaisuuden ja sopivuuden vuoksi. Mönkijöiden massan ollessa yleensä yli 150 kg jarrutehon pitäisi riittää. Koeajojen perusteella jarrut toimivat hyvin.



Kuva 13. Vasen taka-akselipukki ja jarru



Kuva 14. Oikea taka-akselipukki ja jarru

6 Johtopäätökset

Ajoneuvo luovutettiin asiakkaille testattavaksi noin kymmenen viikon kehityksen jälkeen. Asiakastestien jälkeen ajoneuvoon tehtiin parannuksia.

Ensimmäiset koeajot ajettiin pelkillä sähkömoottoreilla, koska mekaaninen voimansiirto ei ollut vielä valmis. Tällöin huomattiin rungon tarvitsevan lisävahvistusta. Ohjaus ja renkaiden ripustus toimivat suunnitellulla tavalla, mutta jarruja ei vielä ollut asennettu. Ajotuntuma ei vielä ollut kovin luotettava rungon puuttellisen vahvistuksen vuoksi, mutta ajoneuvo kesti hyvin yli 20 km:n tuntinopeuden sähkömoottoreilla. Rakennetta vahvistettiin koeajojen jälkeen rungon yläpuolisella alumiinilevyllä ja alapuolisilla teräs-u-profiileilla.

Seuraavassa koeajossa testattiin mekaanista voimansiirtoa ilman sähköavusteisuutta, jolloin havaittiin ajoneuvon suorituskyvyn vastaavan suunnilleen ajotilapiirroksen antamaa teoreettista suorituskykyä. Suorituskykymittauksia ei ehditty tehdä ennen ajoneuvon luovutusta asiakkaille. Ilman tarkkoja mittaustuloksia on mahdotonta varmistaa todellista suorituskykyä. Jarrutusmatkan, nousukyvyn ja sähkömoottorien kantaman mittaaminen antaisi kattavan kuvan suorituskyvystä.

Jarrut olivat asennettu toiseen koeajoon ja ne toimivat tehokkaasti. Lisäjarrutehoa saisi vielä napamoottoreiden jarrutustoiminnosta, mutta sitä ei ehditty saada toimimaan. Mekaaninen jarrutusteho osoittautui riittäväksi. Ajoneuvoa ei päästy koeajamaan sähköavusteisena, mutta polkimiin yhdistetty sähköavusteisuus testattiin ja sen todettiin toimivan suunnitellulla tavalla.

Ajoneuvo luovutettiin asiakkaalle joka tapauksessa toimivana ja turvallisena. Asettetut tavoitteet saavutettiin ajotuntuman kannalta: ajoneuvo tuntuu luontevalta ja turvalliselta ajaa muistuttaen henkilöautoa, mutta käyttövoimana toimii sähkömoottoriavusteinen polkeminen.

Tämän opinnäytetyön osa-alueelta parannettavaksi jäi vielä kääntösäde ja etuakselin jousitus. Suorituskykymittauksia olisi voinut vielä tehdä enemmän, jotta ajodynamiikasta olisi saanut kattavamman kuvan. Poistamalla pienen palan ohjauksen kääntövarresta (kuvassa 11, luvussa 3 alemmassa raidetangossa ja olkanivelessä kiinni oleva osa) tai muotoilemalla osan uudelleen saisi kääntösädettä pienennettyä.

Toistaiseksi kääntövarsi ottaa kiinni etuakseliin rajoittaen kääntösädettä. Etuakselin jousituksessa taas on liian suuri vapaa pystyliike, mikä saa rungon lepäämään jommalla kummalla eturenkaista jatkuvasti. Lisäämällä pohjaanlyöntikumien pituutta ja siten pienentämällä kumien ja etuakselin väliä tulisi etujousituksesta vakaampi. Tämä voi kuitenkin lisätä runkoon kohdistuvaa räsitusta liikaa, joten asiaa kannattaa tutkia. Tarvittavia mittauksia ja testejä olisivat jarrutusmatka eri nopeuksilla, sähkömoottorien kantama, todellinen vierinvastus sekä ajoneuvon kääntymiskyky ja ajovakaus suurimmilla mahdollisilla nopeuksilla (turvallisuus huomioiden).

7 Yhteenveto

Tavoitteena projektissa oli luoda ajotuntumalta henkilöautoa vastaava kevytajoneuvo. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda ajoneuville henkilöautomainen ajodynamiikka ajotilapiirroksen, ohjausgeometrian laskujen ja ripustus- sekä jarruvalinnan avulla. Ajoneuvon toivottiin olevan alumiinirakenteinen, sähköavusteinen velomobiili, jossa on kaksi polkijaa. Tässä tavoitteessa onnistuttiin ja ajodynamiikan osalta ajoneuvo toimii suunnitellulla tavalla. Valmiin prototyypin massa oli lopulta noin 150 kg, joka oli toivottua enemmän. Mikäli ajoneuvosta halutaan kevyempi, on runkorakenne suunniteltava eri tavalla ja jostain muusta materiaalista kuin alumiiniprofiileista. Lopullinen massa ei kuitenkaan ole niin suuri, etteikö ajoneuvoa voisi luokitella kevytajoneuvoksi. Nykyinen runkorakenne on hyvä sen helpohkon kokoonpanon vuoksi. Ainoastaan teräsosat (etuakseli ja poljinpalkit) ovat hitsattuja. Alumiiniprofiilit ovat toisissaan kiinni teräksisillä kulmapaloilla ja levyt ovat ruuvattu profiilirakenteen molemmille puolille. Rakenne, joka olisi kevyempi, mutta samaan aikaan jäykkä, vaatisi joko putkirakenteen tai komposiiteista, esimerkiksi hiilikuidusta valmistetun monokokkirakenteen. Ensimmäinen vaatii paljon hitsausta ja on siten työläs vaihtoehto. Jälkimmäisessä materiaalien hinta ja työn vaativuus nostaisivat ajoneuvon kustannukset jo lähelle tavallista henkilöautoa. Jos kustannukset ja helppo valmistettavuus ovat kriteereinä ajoneuvon onnistumiselle, ovat ne nykyisessä prototyypissä otettu hyvin huomioon.

Parannettavaksi tämän työn osalta jäivät kääntösäde ja (mikäli koetaan tarpeelliseksi) etuakselin jousitus. Ajotilapiirros antaa kattavan kuvan ajoneuvon suorituskyvystä ja on muunnettavissa ajoneuvon ominaisuuksien muuttuessa. Mahdollisiin tuleviin prototyypeihin on siis valmis ajotilapiirros pohja.

Lähteet

- 1 Ajoneuvolaki 1090/11.12.2002
- 2 Magic Pie -sähkömoottorin valmistajan suorituskykytaulukko. 2009. Verk-
kodokumentti. Golden Motor Technology Co. Ltd.
<<http://www.goldenmotor.com/magicpie/16in%20MagicPie%20Performance%20Data.pdf>> Luettu 30.9.2013.
- 3 Laine, Olavi. 1985. Autotekniikka 1. Jyväskylä: Gummerus.
- 4 MAOL-taulukot. 2000. Matemaattisten aineiden opettajien liitto MAOL ry.
Helsinki: Otava.
- 5 Laine, Olavi. 1981. Autotekniikka 2. Tampere: Sonator oy.

Liitteet

1. Ajotilapiirroksen Excel-tiedosto

[illegible]